

Определение температурного коэффициента линейного расширения по интерферограмме

М.Н. Осипов¹, Р.Н. Сергеев^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²АО «РКЦ «Прогресс», ул. Земеца, 18, Самара, Россия, 443009

Аннотация. В данной работе предлагается теоретическое обоснование простого высокоточного метода определения температурного коэффициента линейного расширения материалов как изотропных, так и анизотропных при обработке интерферограмм, получаемых с помощью голографической или цифровой спекл-интерферометрии. Интерферограммы предлагается регистрировать при термоупругих изгибных деформациях образца, вызванных перепадом температур по его толщине. Предлагаемый метод является бесконтактным и не предъявляет особых требований к поверхности исследуемого материала как в случае классической интерферометрии. Приводится численное моделирование процесса термоупругих деформаций образца, подтверждающее правильность предлагаемого метода.

1. Введение

В работе [1] отмечается проблематика материаловедения современных композиционных материалов (КМ), заключающаяся в том, что темпы изучения свойств этих материалов практически не успевают за их созданием. Исследования свойств новых КМ – дорогостоящая и трудоемкая задача. Ее успешное решение обеспечивается при совместном использовании как теоретических, так и экспериментальных методов. Некоторые КМ представляют из себя пластины или оболочки, толщина которых намного меньше их остальных параметров. Также КМ имеют явную анизотропию физико-механических свойств.

Одной из важных характеристик материалов работающих в сложных условиях является температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) вызывающий относительное изменение размеров тела при переменных температурах, что в свою очередь может привести к нарушению работоспособности конструкции. Учёт ТКЛР необходим практически во всех современных отраслях техники и технологий, использующих точное сопряжение деталей, эксплуатируемых при переменных температурах.

В работе [2,3] проведен широкий обзор методов измерения ТКЛР. Отмечается, что, так как ТКЛР большинства материалов достаточно малая величина, то измерение данного коэффициента требует использования высокоточных и высокочувствительных средств. Перечисленным требованиям наиболее полно соответствуют оптические методы измерений, особенно методы голографической интерферометрии, а также получившая развитие на их основе корреляционная цифровая спекл-интерферометрия, которые позволяют производить измерения на материалах без предварительной обработки поверхности и не требуют использования дополнительных оптических элементов связанных с исследуемым материалом.

Известен международный стандарт [4] от ASTM в котором описан метод определения ТКЛР, заключающийся в том, что процесс температурного удлинения регистрируют с помощью интерферометра Фабри-Перо или Физо, в обоих случаях определяется удлинение образца по интерферограммам. Интерферограмма образуется за счет возникшей разности фаз между оптическим элементом, связанным с исследуемым объектом, меняющим свои размеры и жестким основанием. К недостаткам данного метода можно отнести необходимость контактного взаимодействия оптического элемента, находящимся на торце образца, что достаточно сложно и трудоемко, а в целом снижает точность метода, нарушая чистоту эксперимента

В данной работе предлагается простой интерферометрический метод определения ТКЛР материалов как изотропных, так и анизотропных при обработке информации получаемой с помощью голографической или цифровой спекл-интерферометрии при регистрации термоупругих изгибных деформаций образца вызванных перепадом температур по его толщине и без контактного взаимодействия с исследуемым материалом.

2. Методика определения ТКЛР по изгибным деформациям

Известно, что воздействие неравномерного теплового потока на материал приводит к изгибным деформациям исследуемого объекта. Проведем численный эксперимент в конечно-элементном пакете Nastran для образца в виде диска изготовленного из изотропного и анизотропного материала. Схема теплового нагружения исследуемого образца и моделирование изгиба образца предполагалось при линейном распределении температуры по толщине образца и равномерном тепловом нагреве одной поверхности диска. Граничные условия моделировались таким образом, чтобы обеспечить сводное расширение и изгиб образца. На рисунке 1 представлены результаты численного эксперимента.

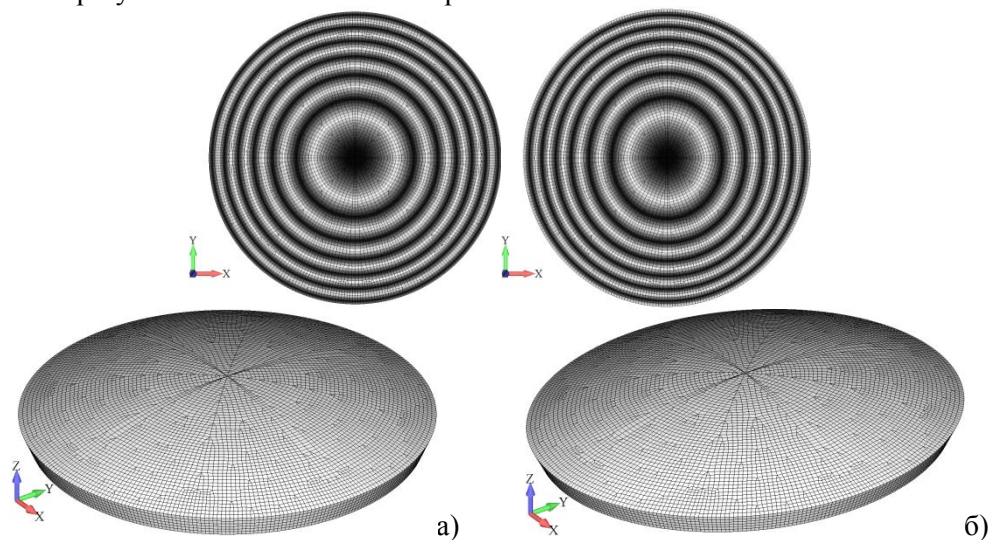


Рисунок 1. а) Результаты численного моделирования температурного изгиба изотропного материала; б) анизотропного материала.

Из численного эксперимента видно (рисунок 1), что при температурном деформировании форма изгиба образца у изотропного материала принимает вид сегмента сферы, а у анизотропного материала сегмент эллипсоида. На рисунке 1 также представлены эквидистантные полосы характеризующие одинаковое перемещение диска при тепловом изгибе относительно начального состояния. Как видно они представляют concentric окружности для изотропного материала и семейство эллиптических кривых для анизотропного материала.

Рассмотрим взаимосвязь между сферической формой изгиба исследуемого образца, связанной с ТКЛР, и кольцевой формой эквидистантных полос. Для вычисления ТКЛР представим диаметрально сечение изгибной сферической поверхности исследуемого образца и графическое представление формы, эквидистантных полос с радиусами r_n и r_m , где n и m – номера эквидистантных полос отсчитываемые от края диска (рисунок 2).

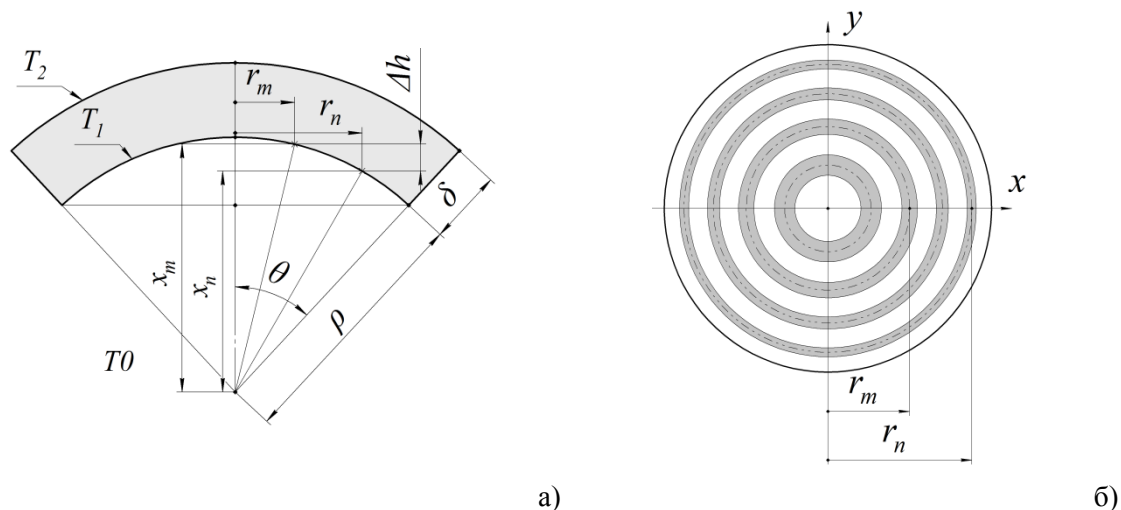


Рисунок 2. а) Расчетная схема; б) определения радиуса кольца на интерферограмме.

В соответствии с гипотезами Кирхгофа, в случае тонких пластин, нормаль к серединной плоскости при изгибе остается прямолинейной и нормальной к деформированной срединной поверхности, в работе авторов [5] получено выражение для определения ТКЛР (α) материала в следующем виде:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T_{21} \frac{\rho}{\delta} - \Delta T_1}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{21} = T_2 - T_1$, $\Delta T_1 = T_1 - T_0$, δ – толщина образца, ρ – радиус-вектор кривизны поверхности.

Таким образом, для определения ТКЛР необходимо знать радиус кривизны изгиба поверхности, толщину δ исследуемого образца, которая связана с перепадом температуры по толщине образца и значение температур на поверхностях исследуемого диска.

При нагреве образца кроме его изгиба меняется начальная толщина δ_0 . Будет уместно предположить, что начальная толщина δ_0 и δ после деформирования с высокой степенью точности равны, так как утолщение образца за счет теплового расширения мало, в связи с тем, что ТКЛР для большинства материалов находится в диапазоне $(10^{-7} - 10^{-6})^\circ\text{C}^{-1}$.

Для решения поставленной задачи, рассмотрим связь радиуса кривизны ρ изгиба поверхности с радиусами r_n и r_m эквидистантных полос. Из представленной на рисунке 2а схемы изгиба исследуемого образца следует, что радиус-вектор кривизны, характеризующий изгиб образца, определяется через радиусы r_n и r_m эквидистантных полос следующей формулами:

$$\rho^2 = x_m^2 + r_m^2, \quad (2)$$

$$\rho^2 = x_n^2 + r_n^2, \quad (3)$$

$$x_m = x_n + \Delta h_{nm}, \quad (4)$$

где Δh_{nm} – высотная разность между эквидистантными полосами с радиусами r_n и r_m , а также учтем, что в нашем рассмотрении $n > m$.

Решая систему уравнений образуемых выражениями (2-4) для радиус-вектора кривизны получим следующее выражение:

$$\rho = \left(r_n^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{r_n^2 - r_m^2}{\Delta h_{nm}} - \Delta h_{nm} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Таким образом получена связь между радиус-вектором кривизны, характеризующим изгиб образца, и радиусами эквидистантных полос, а также высотной разностью между эквидистантными полосами. Данные величины можно определить с помощью интерферометрических измерений.

3. Методика определения ТКЛР по интерферограммам

Регистрация изгибных деформаций методами цифровой голографической или спекл-интерферометрии позволяет зафиксировать интерференционные картины, которые несут информацию об изгибных деформациях исследуемого образца и в нашем случае будут соответствовать эквидистантным картинам, описанных выше. Как известно, голографические и спекл-интерферограммы это чередование светлых и темных полос. Каждой интерференционной полосе соответствует перемещение u_n относительно начального состояния, и которое определяется следующими выражениями [6-7]:

для темных полос в спекл-интерферометрии:

$$u_n^{\text{темн}} = \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 0; \pm 1; \pm 2; \dots; \quad (6)$$

для светлых полос в спекл-интерферометрии:

$$u_n^{\text{светл}} = \frac{(2n+1)\lambda}{4}, \quad n = 0; \pm 1; \pm 2; \dots, \quad (7)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, n – порядок интерференционных полос.

Для голографической интерферометрии соотношение (1) выполняется для светлых полос, а соотношение (2) соответственно выполняется для темных полос. Данные соотношения соответствуют оптической схеме регистрации интерферограмм, в которой направление освещения когерентным излучением исследуемого образца и направление регистрации совпадают, что аналогично оптической схеме интерферометра Майкельсона.

Для разработки метода расчета ТКЛР по интерферограммам рассмотрим схему теплового нагружения исследуемого образца и оптическую схему регистрации интерферограмм представленных на рисунке 3а. Исследуемый образец 1 располагается свободно на жестком основании 3. При равномерном тепловом нагружении 4 данного образца с одной стороны, произойдет его изгиб из положения 1 (недеформированное состояние) в положение 2 (деформированное – изгиб), поверхность изгиба будет представлять сферическую поверхность для изотропных материалов и криволинейную поверхность при испытании анизотропных материалов. На рисунке 3б представлена типичная спекл-интерферограмма изгиба исследуемого образца под воздействием равномерного теплового нагружения.

Таким образом, используя уравнения (1), (5) и (6), для определения ТКЛР получим следующее уравнение при измерении радиусов темных полос на спекл-интерферограмме:

$$\alpha^{\text{темн}} = \frac{1}{\Delta T_{21} \frac{1}{\delta_0} \left(r_n^2 + \left(\frac{r_n^2 - r_m^2}{\lambda(m-n)} - \frac{\lambda}{4}(m-n) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \Delta T_1} \quad (8)$$

Аналогичное выражение для определения ТКЛР через измерения радиусов светлых полос на спекл-интерферограмме можно получить используя уравнения (1), (5) и (7).

Формула (8) позволяют рассчитать ТКЛР по одному измерению двух радиусов интерференционных полос на спекл-интерферограмме.

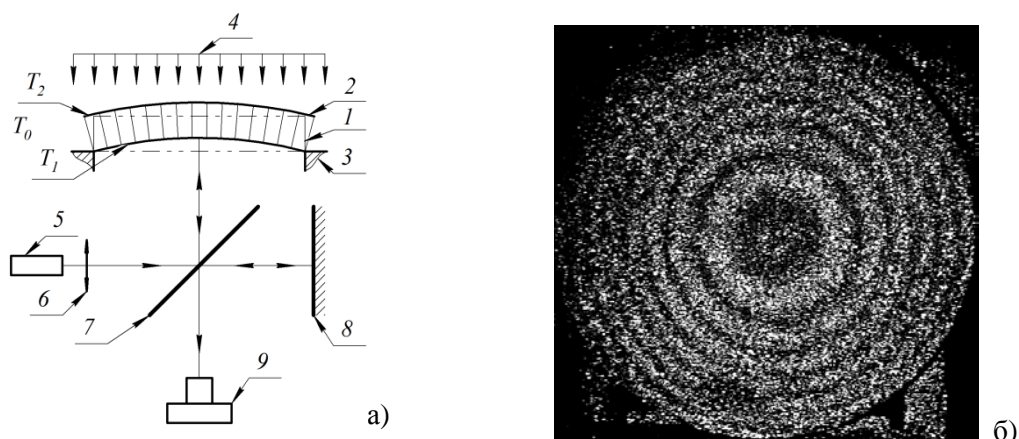


Рисунок 3. а) Экспериментальная схема с интерферометром Майкельсона: 1-недеформированное состояние образца; 2 – деформированное состояние образца; 3 – основание; 4 – тепловой поток; 5 – лазер; 6 – расширитель пучка; 7 – полупрозрачное зеркало; 8 – опорное зеркало; 9 - видеокамера или фотоматериал; б) Характерная спекл-интерферограмма температурного изгиба образца.

Снизить роль систематических ошибок и повысить точность определения ТКЛР можно, если ТКЛР определять через среднее арифметическое при измерении нескольких радиусов интерференционных полос, причем m и n не обязаны быть рядом стоящие, поэтому можно создать достаточно большое количество сочетаний разностей радиусов.

4. Заключение

Предложен метод на основе голографической или спекл-интерферометрии регистрирующий бесконтактным способом температурные деформации представляющие изгиб образца для определения ТКЛР образцов материалов с шероховатой поверхностью.

Точность и надежность получаемых результатов можно повысить за счет статистической обработки большого количества радиусов интерференционных полос на спекл-интерферограммах.

Предложенным способом можно получать ТКЛР как для изотропных материалов, так и для анизотропных материалов. В случае анизотропных материалов необходимо производить расчет в различных диаметральных сечениях изгиба криволинейной поверхности.

Разработанный метод существенно расширяет возможности измерений ТКЛР как изотропных, так и анизотропных материалов, и дополняет классические интерференционные методы дилатометрии, поскольку позволяет измерять свойства образцов, исследование которых представлялось затруднительным.

5. Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-08-06330-а и № 16-08-00571-а.

6. Литература

- [1] Гофин, М.Я. Механика сотовых конструкций / М.Я. Гофин, А.А. Иванов. – М.: Мир, 2012. – 523 с.
- [2] James, J.D. A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures / J.D. James, J.A. Spittle, S.G. Brown, R.W. Evans // Measurement Science and Technology. – 2001. – Vol. 12(3). – P. 1-15.

- [3] Wolff, E.G. Fundamentals of Optical Interferometry for Thermal Expansion Measurements. Invited review paper / E.G. Wolff.–Lancaster, PA: Proceedings DEStech Publications, 2001. - 20 p.
- [4] E 289-04 ASTM Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Rigid Solids with Interferometry, 2004. – 9 p.
- [5] Сергеев, Р.Н. К вопросу о возможности определения температурного коэффициента линейного расширения с помощью цифровой спекл-интерферометрии / Р.Н. Сергеев, М.Н. Осипов // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела. – Самара, 2017. – С.194-197.
- [6] Вест, Ч. Голографическая интерферометрия / Ч.Вест. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
- [7] Кудрин, А.Б. Прикладная голография (исследование процессов деформации металлов) / А.Б.Кудрин, В.Г.Бахтин. – М.: Металлургия, 1988. – 248 с.

Determination of the temperature coefficient of linear expansion by interferogram

M.N.Osipov¹, R.N.Sergeev^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²JSC SRC Progress, Zemetsa street 18, Samara, Russia, 443009

Abstract. In this paper we propose a theoretical justification for simple high-precision method of determining the temperature coefficient of linear expansion of the materials as isotropic and anisotropic in the processing of interferograms obtained by holographic and digital speckle interferometry. The interferogram is proposed to register under bending thermoelastic deformations of the sample caused by the temperature difference through thickness. The proposed method is contactless and does not impose special requirements to the surface material as in the case of classical interferometry. Is numerical modeling of thermoelastic deformations of the sample, confirming the correctness of the proposed method.

Keywords: processing digital images, speckle interferograms, accuracy, temperature coefficient of linear expansion, displacement.